



*Centro Internazionale di  
Aggiornamento Sperimentale – Scientifico*

SEMINARIO SUL TEMA  
“EVOLUZIONE NELLA SPERIMENTAZIONE  
PER LE COSTRUZIONI”

---

Prof. Angelo Di Tommaso – Università ALMA MATER di Bologna  
*“Sopravvivenza di torri e campanili in ambiente sismico”*





## SOPRAVVIVENZA DI TORRI E CAMPANILI IN AMBIENTE SISMICO

Angelo DI TOMMASO\* - Susanna CASACCI \*

\* Università ALMA MATER di Bologna

DICAM - Scuola di Ingegneria e Architettura

v.le Risorgimento, 2 - 40135 Bologna

### *Sommario*

*Nel presente articolo si menziona il problema generale della ricostruzione di un campanile severamente danneggiato o crollato per il sisma. Sono possibili infatti due strategie: la ricostruzione dov'era e "apparentemente" com'era oppure la costruzione dov'era di una nuova architettura.*

*Con riferimento alle tipologie ricorrenti in Italia si analizzano poi i danni ad alcuni campanili, documentati dopo alcuni recenti terremoti, legati all'architettura isolata, addossata o sovrapposta all'edificio di culto.*

*Un cenno alle attuali tendenze in tema di "pronto intervento post-sisma", a seguito di gravi danni, mostra recenti soluzioni adottate per i campanili, con loro pregi e difetti.*

*Successivamente si passa a esaminare la prassi delle verifiche sismiche su modello delle torri secondo la normativa italiana, mettendone in luce metodiche ed efficacia.*

*In ultimo si menzionano le attuali tecniche di rinforzo che utilizzano i materiali compositi.*

*Due casi di studio concludono la memoria: la torre civica Ghirlandina ed il campanile di san Barnaba, entrambi a Modena.*

## 1 Introduzione

Torri e campanili, per la morfologia strutturale che li caratterizza, sono edifici che presentano un'elevata vulnerabilità sismica.

La fase di danneggiamento severo o di crollo dovuta ad eventi sismici è seguita da una fase di *ricostruzione* che può essere realizzata attraverso due principali procedure:

- ricostruzione del campanile “apparentemente uguale” a com'era prima al sisma, si realizza cioè una sorta di “clone”; questa soluzione richiede o un rinforzo strutturale senza impatto visivo o semplicemente un miglioramento della muratura utilizzata;
- ricostruzione del campanile con caratteristiche estetiche e strutturali del tutto nuove.

Due casi emblematici di ricostruzione di campanili secondo queste due procedure sono rispettivamente il campanile di Majano (UD) e il campanile di Gemona (UD) crollati in seguito al sisma del Friuli nel 1976 [1], [2].

In particolare nel caso del campanile di Gemona (UD) si è proceduto ad una ricostruzione con l'apparenza simile al precedente crollato, celando un rinforzo consistente in calcestruzzo armato con pietre esterne incastonate: una soluzione che apparentemente ha riprodotto il vecchio campanile come clone, ma in realtà è strutturalmente molto diversa. Per un osservatore si ha però la riproduzione della immagine del vecchio campanile.

Nel caso del campanile di Majano (UD), anch'esso crollato per il sisma del 1976, si è scelta la soluzione diametralmente opposta, cioè si è costruito un nuovo campanile, differente per tecnologia (calcestruzzo armato) e morfologia.

Le posizioni culturali avverse alla prima soluzione parlano di realizzazione di un “falso”; gli avversari della seconda soluzione parlano di “cancellazione della memoria storica”. Comunque la logica vuole che non si deve ricostruire *com'era e dove era* una costruzione crollata per sisma ma si può solo ricostruire come appariva ed in possesso della capacità adeguata a soddisfare la domanda sismica del sito.

## 2 Morfologie e tecnologie ricorrenti in Italia

Torri e campanili sono stati costruiti secondo morfologie e tecnologie diverse. In alcuni casi, stanti i lunghi tempi di costruzione dei manufatti con periodi di ferma alternati a periodi di attività nonché i rifacimenti e ristrutturazioni a cui sono stati sottoposti, coesistono tipologie costruttive diverse nella stessa struttura.

Al fine di semplificare le analisi per questa classe di strutture, la torre campanaria viene identificata come unico Macroelemento, la cui architettura può essere diversa, in particolare:

- campanile isolato
- campanile addossato
- campanile sovrapposto ad edificio di culto.

Questa prima distinzione è di grande importanza perché la presenza di strutture a contatto modifica le frequenze proprie di vibrazione della struttura che, risultando

irrigidita se addossata, vede incrementare la domanda sismica. In generale i meccanismi tipici di collasso sismico sono fortemente legati all'architettura del campanile oltre che alla tecnologia costruttiva, al materiale utilizzato, alle prestazioni del terreno sottostante e della struttura di fondazione. Rispetto a questo ultimo punto va ricordato che le strutture in parola risultano dinamicamente molto sensibili alla deformabilità del terreno sottostante e alle palificate di sotto fondazione. Inoltre è assai frequente l'insorgere di strapiombi, a volte già durante la costruzione, che, evolvendo nel tempo, rappresentano un progressivo aggravio del cemento di alcune parti della muratura. Moltissimi sono i casi di torri e campanili fessurati, spesso con spacchi verticali fra le finestrate.

Le tecnologie costruttive più utilizzate per la muratura sono: muratura piena, muratura a due foglie oppure muratura a sacco, quest'ultima utilizzata alle quote più basse dove, per il maggior peso, le murature raggiungono spessori molto elevati (dell'ordine di metri).

Nella pianura padana gran parte dei campanili furono realizzati in mattoni, in Friuli e nell'Italia Centrale e Meridionale il materiale più utilizzato fu la pietra; questa diversità ha origini storiche, infatti, il mattone rappresenta i prodromi dell'industrializzazione, processo tipico delle zone settentrionali d'Italia.

La qualità delle murature dipende dalla qualità dei mattoni, dal materiale di riempimento dei muri a sacco, dalla qualità e dagli spessori dei giunti di malta e soprattutto dalla maestria dei costruttori: come già detto non è infrequente riscontrare manufatti che nel loro sviluppo costruttivo presentano caratteristiche diverse con la altezza quasi sempre perché costruiti e rimaneggiati in tempi differenti. Va da se che eventuali incatenamenti e ammorsamenti dei paramenti murari hanno grande importanza ai fini della risposta strutturale in quanto, ad esempio, contrastano le spinte esercitate dalle volte e le eccentricità dello sforzo sulle pareti con risega.

I campanili possono essere poi considerati suddivisi in Sub-Macroelementi quali: fondazione, basamento, fusto (o tronco), cella campanaria, cuspide e pinnacoli. Vi sono poi elementi quali telaio interno alla cella come sostegno alle campane, diaframmi orizzontali (quali volte o solai lignei), scale in muratura o in legno che possono avere notevole impatto sulle caratteristiche tensio-deformative della struttura.

Le campane con il loro funzionamento agiscono come forze sollecitanti nei confronti della struttura: per questo motivo di grande importanza è il telaio interno alla cella come struttura di sostegno alle campane che è, in molti casi, collegato ai piedritti, situazione che risulta favorevole per la sicurezza strutturale; quando questo collegamento non è presente si ha un movimento del telaio con il fenomeno del "Colpo d'Ariete" sulle pareti laterali, specialmente durante una crisi sismica.

La cella campanaria, caratterizzata da ampie finestrate sui lati, si comporta come un telaio, non in calcestruzzo armato ma soggetta a meccanismi simili di collasso. Si son notati meccanismi di collasso in fase di crisi sismica quali traslazione o rototraslazione dei ritti, traslazione o rototraslazione dei ritti con rottura per taglio del traverso superiore, rototraslazione verso l'esterno di ambiti murari alla base dei ritti.

Da quanto esposto si deduce facilmente come l'analisi dello "stato di fatto" sia di notevolissima importanza quando si affronta un problema di rinforzo strutturale per questo tipo di manufatti: la conoscenza della struttura dal punto di vista geometrico e

dei materiali è premessa indispensabile per evitare interventi che, lungi dal migliorare la situazione strutturale, la peggiorino andando a concentrare sforzi e domanda di spostamenti in una sezione piuttosto che un'altra. Queste strutture infatti non si prestano per una definizione univoca delle sezioni critiche, infatti è necessario analizzare la struttura nel suo complesso identificando i minimi valori dei moltiplicatori delle azioni che conducono alla formazione di vari potenziali e probabili meccanismi, intendendosi, con questa parola, una qualsiasi labilità.

### 3 Tipologie dei danni sismici

Si ipotizza di analizzare una “torre isolata” (come già detto il comportamento strutturale delle torri è sensibilmente influenzato da strutture collegate), si possono individuare, seguendo lo schema [1] del Prof. F. Doglioni dello I.U.A.V. di Venezia, **sei situazioni principali di danno** (fig.1) **facendo riferimento specificatamente ai cinematismi**:

- a. rotazione verso l'esterno della parete superiore (del tronco) della torre campanaria dovuta ad azioni di fuori piano, con formazione di una cerniera cilindrica ad asse orizzontale o di cerniera sferica in corrispondenza di un punto o di uno spigolo /mecc. 1.a, 1.b/;
- b. traslazione della parete superiore (del tronco) della torre campanaria, seguita da rotazione della stessa /mecc. 2.a, 2.b/;
- c. rotazione verso l'esterno di “ambiti di angolata” attorno ad un punto di cerniera formatosi sull'angolata della stessa, all'estremo inferiore della parte interessata dal meccanismo /mecc. 3/;
- d. rotazione verso l'esterno di una o più angolate con asse di rotazione orizzontale parallelo al lato o alla diagonale /mecc. 4/;
- e. rotazione della parte superiore (del tronco) della torre, risultante dalla combinazione di una rotazione intorno ad un asse verticale e di una rotazione intorno ad un asse orizzontale /mecc. 5/;
- f. traslazione della parte superiore della torre /mecc. 6/.

A ciascun cinematismo descritto corrisponde un quadro fessurativo collegato.

Ad esempio tipica la situazione e con evidenziazione delle fessure a X.

Nei meccanismi 1.a e 1.b la energia dissipata è essenzialmente come **modo I** della meccanica classica della frattura (**MF**), mentre gli altri meccanismi dissipano secondo il **modo II** e **modo III** della **MF**. La evoluzione del danno risulta complessa in quanto ad ogni oscillazione la struttura danneggiata risulta cambiata.

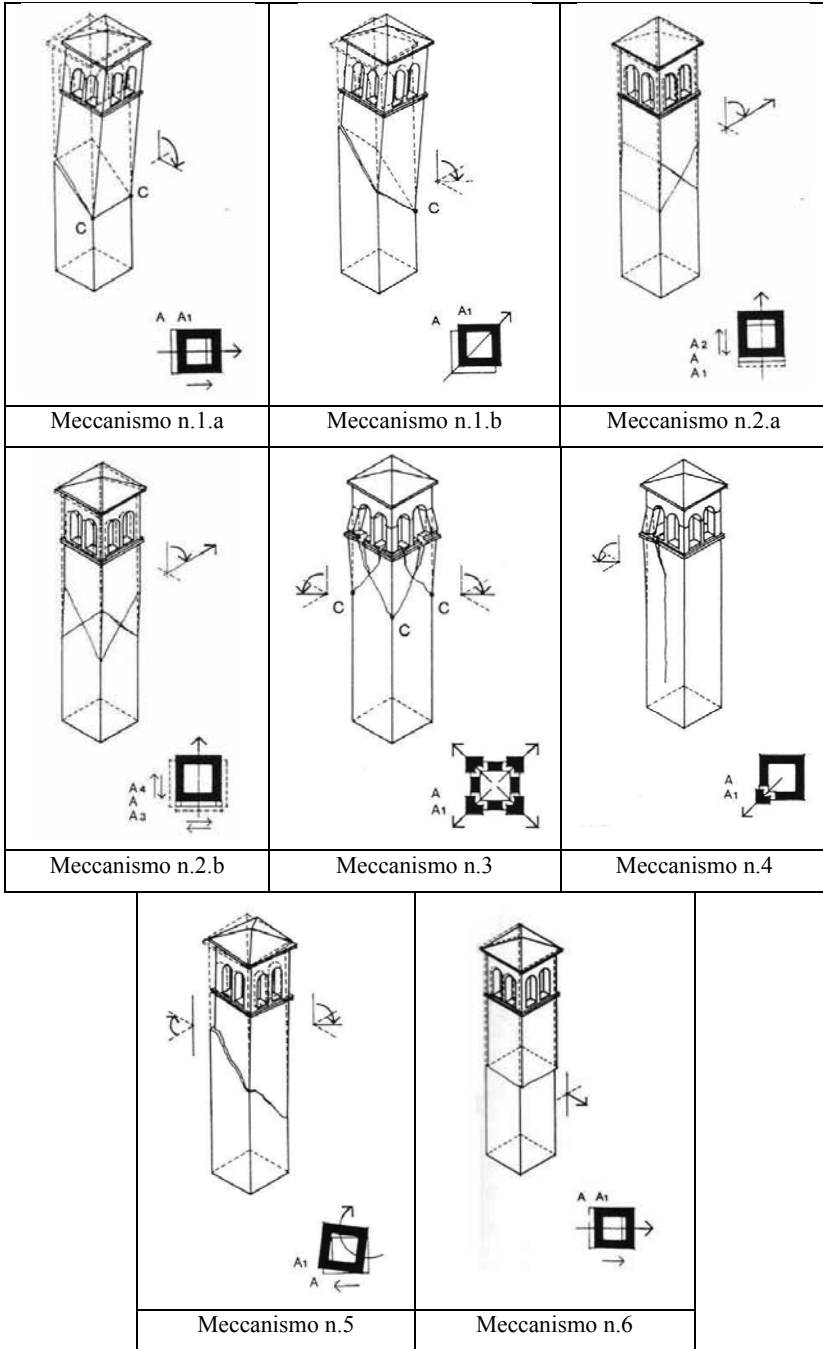


Figura 1: Situazioni principali di danno per campanili isolati [1]

### 3.1 Crolli e demolizioni con successiva ricostruzione

Numerosi sono i campanili che in seguito ad eventi sismici crollano o vengono demoliti perché pericolanti e successivamente ricostruiti.

Il campanile della chiesa dei S.S. Pietro e Paolo Ap. di Majano (UD) (fig. 2 e 3) era un campanile isolato di pietra locale detta “tufo” [2]. Erano presenti una risega *sapientemente* collocata all'esterno coperta da cornice in pietra, una finestratura della cella campanaria molto ampia e una pesante guglia. In tempi precedenti al sisma, il telaio metallico delle campane era stato tolto.

In seguito al sisma del Friuli nel 1976 si è verificato il crollo della cella campanaria, del tamburo e della guglia. Interessante è il meccanismo di collasso: infatti, si è verificato uno spostamento verso l'esterno della parte superiore della torre, a seguito di rotazioni intorno a cerniere cilindriche ad asse orizzontale (meccanismo 1), con la formazione e crollo di grandi blocchi di muratura (meccanismo labile). Successivamente è stato demolito e ricostruito ex novo con forme e tecnologie diverse.

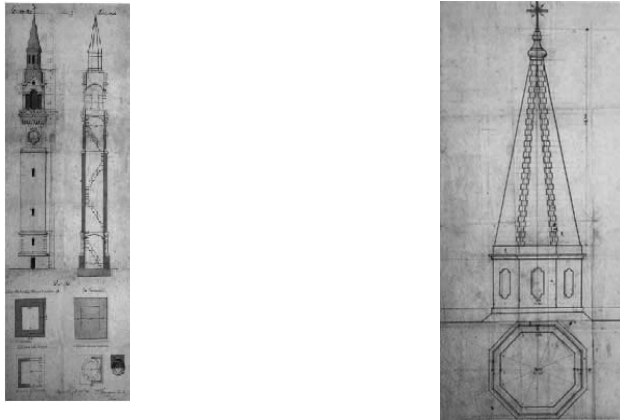
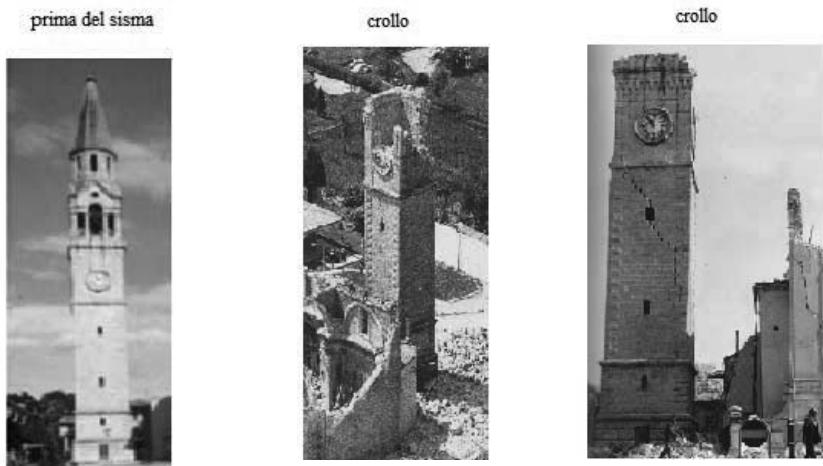


Figura 2: Progetto del campanile di Majano (UD) nel 1892 a opera dell'ingegnere E. Paoluzzi [2]





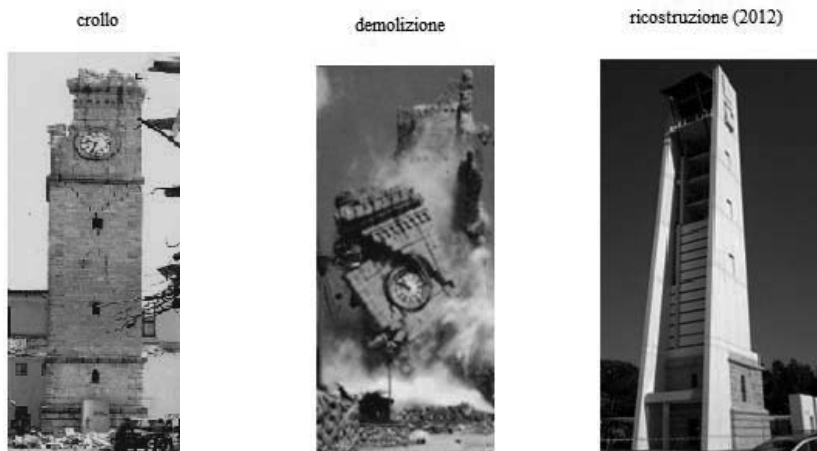


Figura 3: Campanile di Majano (UD): crollo, demolizione e successiva ricostruzione [2]

Diverso invece è il caso della torre campanaria di Gemona del Friuli (UD) (fig. 4). Infatti, in seguito al sisma del 1976, è crollato interamente tranne un muro (meccanismo 4), venne in seguito abbattuto anche l'ultimo muro e ricostruito in calcestruzzo armato con le pietre incastonate con apparenza simile al primitivo.



Figura 4: Campanile di Gemona (UD): crollo e successiva ricostruzione

Un caso analogo al campanile di Gemona si ha per il Campanile di S. Francesco in Campli (TE) in Abruzzo (fig. 5). In seguito al sisma dell'Aquila nell'Aprile 2009 il campanile, pur distante dall'epicentro, ha vibrato notevolmente e, in seguito, osservando la muratura fu evidente che non riportava lesioni visibili. In realtà si è scoperto che negli anni precedenti al terremoto la torre campanaria aveva ricevuto un esteso rafforzamento in calcestruzzo armato all'interno e finta muratura all'esterno.

Questo tipo di soluzione era largamente impiegata negli anni '80-'90 ma attualmente non è più accettata dalla critica per il forte distacco dalla situazione originale e il falso tecnologico, sebbene strutturalmente risponda bene alla domanda sismica.

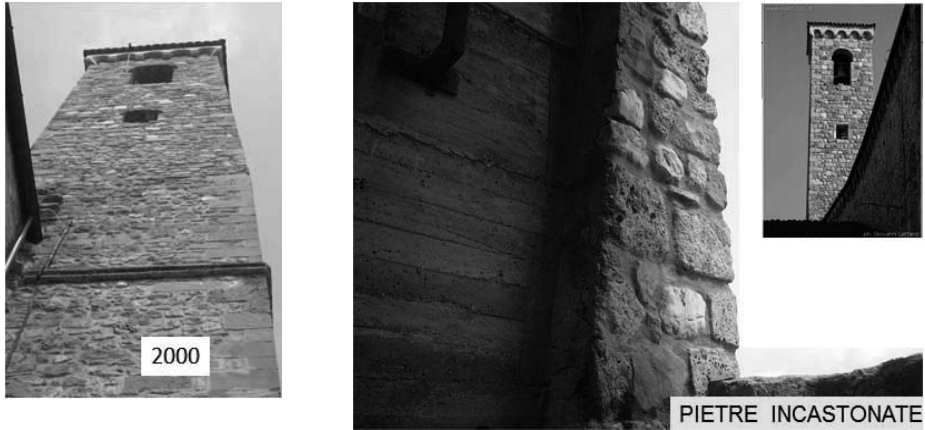


Figura 5: Campanile di San Francesco in Campli (TE): calcestruzzo armato interno con finta muratura esterna.

Un esempio di torre campanaria isolata con ottima capacità sismica è rappresentata dal campanile di Mirabello (MO) (fig. 6). In seguito al terremoto dell'Emilia il 29 Maggio 2012, il campanile non ha riportato alcun danno se non qualche lesione nella cella campanaria [3], al contrario della chiesa di San Carlo, posta a fianco del campanile, che è stata totalmente distrutta dall'evento sismico. In questa zona è avvenuto il fenomeno della liquefazione, in particolare si sono verificate sul sagrato lesioni a terra di grandi dimensioni con la seguente fuoriuscita di sabbia bagnata.



Figura 6: Campanile di Mirabello (MO) in seguito al sisma dell'Emilia ed esempio di frattura al suolo conseguente al fenomeno della liquefazione [3]

### 3.2 Meccanismi di danno sismico: lesioni a Y e lesioni diagonali

Il caso di lesioni a Y è tipico di campanili addossati ad un edificio. Infatti, durante l'evento sismico, la torre campanaria oscilla in due direzioni opposte quindi si formano due fratture inclinate ortogonali alle due direzioni di trazione cioè infatti accade se sussiste una zona di contatto tra l'edificio e il campanile la quale si comporta come un appoggio attorno a cui ruota con asse orizzontale la struttura snella in elevazione.

Un caso rappresentativo di questo fenomeno fu il Campanile di San Pietro-Coppito (AQ) (fig. 7). Composto principalmente da muratura a sacco, muratura a conci sbazzati con paramento di limitato spessore e nucleo interno, in seguito al terremoto dell'Aquila nel 2009, la parte sommitale si è staccata ed è precipitata all'interno della adiacente chiesa. La cella campanaria, in precedenza costruita in calcestruzzo armato, è letteralmente scivolata sul piano inclinato formatosi con il cedimento del paramento esterno della muratura di pietrame a sacco del campanile. Inoltre la restante parte di struttura presenta lesioni in corrispondenza dello stacco dal corpo della chiesa e lesioni a taglio e scorrimento di foggia non molto dissimile dalla conformazione ad Y.



Figura 7: Campanile di San Pietro a Coppito (AQ)

Anche il Campanile in mattoni della Chiesa di Cavezzo (MO) (fig. 8) addossato al solo tetto del vescovato, in seguito al sisma dell'Emilia del 29 Maggio 2012, ha riportato lesioni a Y nella parete frontale ortogonale alla parete di contatto e fratture inclinate deviate dalle aperture sulla parete laterale [3].

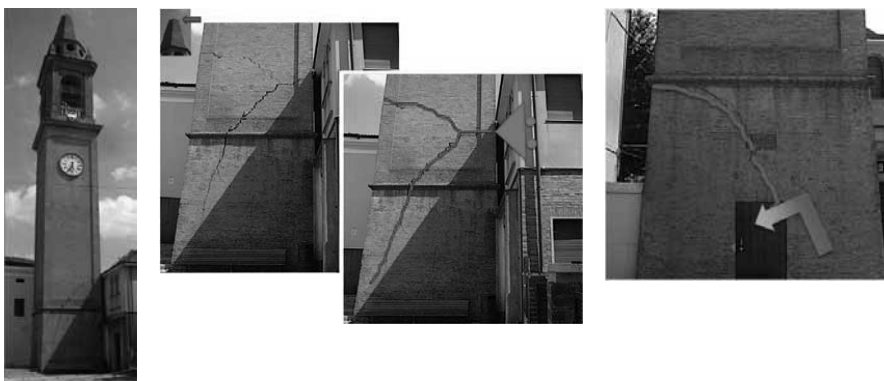


Figura 8: Campanile di Cavezzo (MO) in seguito al sisma dell'Emilia del 29 Maggio 2012

### 3.3 Lesioni dovute alla combinazione tra rotazione attorno ad asse verticale e rotazione attorno ad asse orizzontale

Il meccanismo 5, rappresentato dalla combinazione tra rotazione attorno ad un asse verticale e rotazione attorno ad un asse orizzontale, si manifesta con un tipo di danno caratterizzato da lesioni ad andamento obliquo lungo i quattro lati della torre.

A titolo esemplificativo si riporta il Campanile in muratura di pietrame della Chiesa di S. Martino V. di Resiutta (UD) (fig. 9). Il meccanismo di ribaltamento e rotazione della torre è evidenziato sia dal fuori piombo, sia dalla lesione macroscopica; è visibile anche la presenza di meccanismi secondari di rottura a taglio [1].

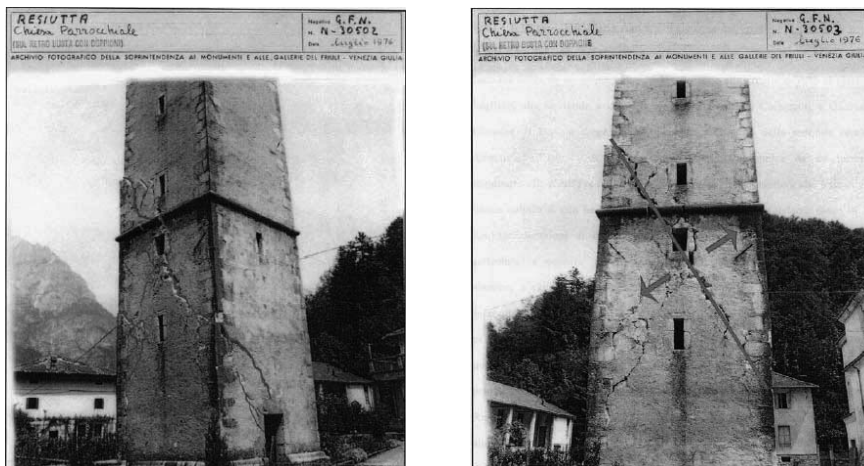


Figura 9: Campanile della Chiesa di S. Martino V. di Resiutta (UD) in seguito al sisma del Friuli del 1976 [1]

### 3.4 Lesioni a X e fenomeno delle dislocazioni per roto-traslazione

Nelle torri campanarie isolate, i danni sono principalmente dovuti al meccanismo 2 quindi fratture di tipo a X. Quando però, in seguito alla formazione della prima frattura diagonale, la parte del campanile sovrastante la frattura formata si comincia a slittare, senza dare il tempo per la formazione della seconda fessura diagonale a formare la X, si evidenzia una dislocazione nella parte alta della macrofessura, con sola macrolesione diagonale [1].

Un caso emblematico di dislocazione apparve nella torre civica con cella campanaria costruita in mattoni nel '700 sopra un torrione in muratura piena di mattoni, residuo del Castello dei Gonzaga (fig. 10) a Bagnolo (RE) [7]. Il castello fu distrutto e rimase solo la torre in muratura, quindi con tutte le caratteristiche di un campanile isolato tranne il fatto di essere massiccio. In seguito al sisma del 1996, con epicentro vicino a Bagnolo in Piano (RE), si osserva la formazione di una prima frattura inclinata con un successivo scorrimento di circa 10 cm della parte di torre sovrastante la lesione; le lesioni inoltre vennero richiamate dalle aperture quindi tendenti a deviare.

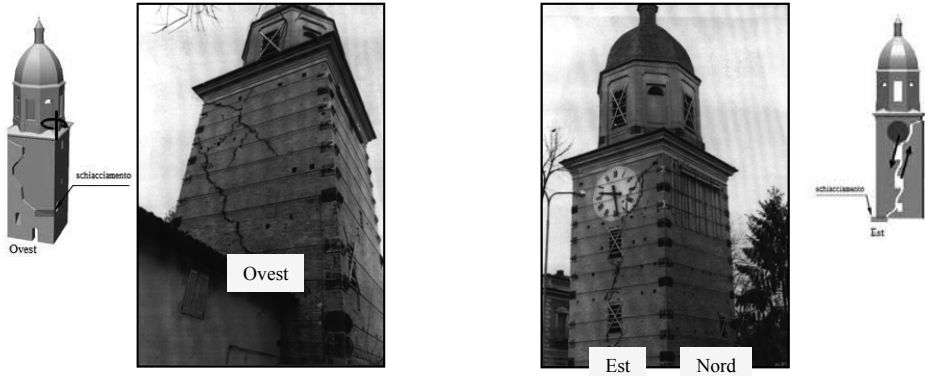


Figura 10: Torrazzo Gonzaga Bagnolo in Piano (RE) danneggiato dal sisma reggiano-modenese dell'Ottobre 1996

Il Campanile isolato di Reno Centese (fig. 11) in comune di Cento (FE), in muratura piena di mattoni, durante il sisma dell' Emilia del 2009, era in fase di restauro cosmetico: esso ha riportato una macrolesione inclinata con conseguente scorrimento e dislocazioni in due direzioni (in una direzione la dislocazione è dell'ordine di 20 cm), infatti la prima macro-lesione diagonale ha innescato lo scorrimento evitando la seconda lesione diagonale che avrebbe generato la classica X detta di Taglio. Il campanile è stato molto prossimo al crollo [3].

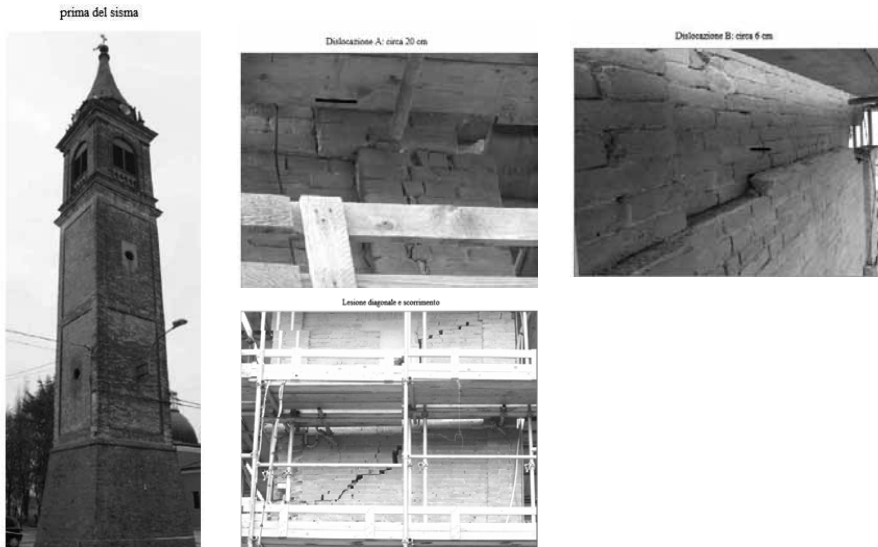


Figura 11: Campanile di Reno Centese nel comune di Cento (FE): principali lesioni subite in seguito al sisma dell'Emilia del 2012

#### 4 Pronto intervento

Una prima classificazione per funzione strutturale dei sistemi di pronto intervento utilizzati per le torri campanarie (fig. 12) può essere:

- A. Puntello
- B. Cintura
- C. Gabbia

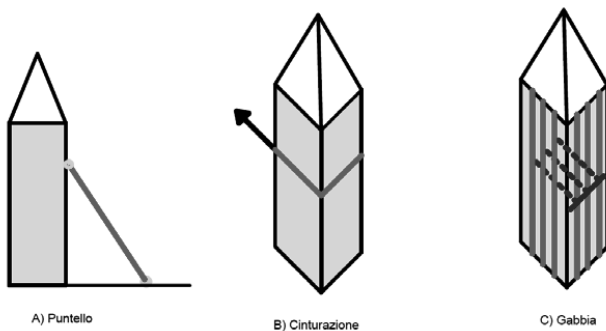


Figura 12: Schemi dei sistemi di pronto intervento e presidio

Il **puntello** è un elemento esterno che impedisce il ribaltamento delle pareti e sviluppa azioni di sostentamento. Inizialmente veniva fatto in muratura e i principali svantaggi erano: il lungo tempo di costruzione, l'ingombro, l'aumento delle masse che il sisma poteva attivare e l'ostacolo alle successive operazioni di consolidamento e ricostruzione. Successivamente, per diminuire sia i tempi di esecuzione sia i pesi, venivano realizzati in legno e, in tempi più recenti, il puntello è stato realizzato con strutture reticolari spaziali di tubi che generalmente si usano per i ponteggi. In quest'ultimo caso, il processo costruttivo risulta "industrializzato" ma restano gli svantaggi dell'ingombro e del costo dell'attrezzatura immobilizzata.

Un caso emblematico di pronto intervento è rappresentato dal campanile addossato di Casumaro a Cento (FE), costruito in muratura. In seguito al sisma dell'Emilia del 2012, ha riportato la lesione a Y lungo la parete ortogonale e adiacente alla Chiesa di San Lorenzo (facciata sud) in seguito all'urto contro la copertura di quest'ultima, e lesioni a X lungo la parete della facciata est. A seguito di ciò, sono stati realizzati puntelli al campanile con strutture reticolari a cura di imprese di fiducia del comune di Cento (fig.13).

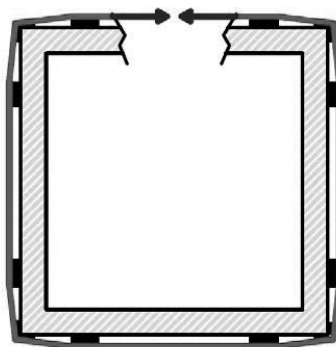


Figura13: Facciata sud ed est del campanile di Casumaro Cento (FE) in seguito al sisma dell'Emilia del 2012 e sistema di pronto intervento a puntello

Punti essenziali delle tecnologie di pronto intervento è che esse siano rimovibili, non invasive e non ostacolino le operazioni di intervento definitivo. Per questi motivi, infatti il sistema a puntello precedentemente descritto oggi è stato superato e sostituito dai sistemi di cinture e a gabbia.

La **cinturazione** (fig.14) è un sistema in trazione richiuso su se stesso che fa uso, in prevalenza, di cinghie messe in tensione con dispositivi a cremagliera (cricchetti). La conformazione delle cinture deve evitare tratti lunghi senza rinvii, interponendo ripartitori (generalmente lignei) sulla struttura da sostenere. A seguito di questo intervento, la struttura, in fase dinamica, mantiene la compattezza scatolare.

Le brache in fibra per il sollevamento (o cinghie) utilizzate per le cinturazioni strutturali sono confezionate impiegando fibre artificiali di elevate prestazioni meccaniche; generalmente sono costituite da fibre di poliestere (PES).



SEZIONE ORIZZONTALE

Figura14: Conformazione delle cinturazioni secondo il poligono funicolare

Per le configurazioni con lunghi tratti (maggiori di 3 metri) si deve tenere conto degli allungamenti alla tensione di progetto. L'allungamento ad una tensione media di esercizio raggiunge il 3%. Quando le brache sono utilizzate per il sollevamento dei carichi, la normativa specifica impone un coefficiente di sicurezza pari a 7.

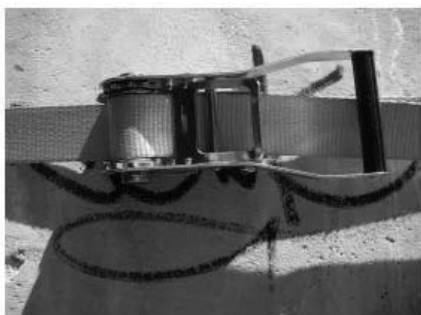


Figura 15: Brache di poliestere

La cinturazione con brache di poliestere è una soluzione rapida, a costi contenuti e rappresenta la vera novità nell'ambito degli interventi post-sisma.

Lo svantaggio delle brache sintetiche risiede solo nell'allungamento viscoso che richiede ritesature periodiche.

Alternativa alle brache di poliestere, sono le cinturazioni con funi di acciaio, anche se queste richiedono dispositivi di tesatura e rinvio più complessi, nonché costi maggiori.

Un'applicazione di cinturazione fu attuata nel Torrazzo Gonzaga (fig.16) danneggiato a seguito del sisma reggiano-modenese dell'Ottobre 1996. Sono state eseguite cerchiate con barre di acciaio ad alta resistenza e a filettatura continua ancorate con piastre d'angolo; queste ultime sono state posizionate attraverso l'impiego di piattaforme aeree. Dall'immagine sottostante, rappresentante l'intervento si può osservare che le prime piastre posizionate si sono arrugginite, le restanti no; questo fenomeno è dovuto al fatto che per le prime non c'è stato il tempo necessario per effettuare un trattamento preliminare di zincatura, per le altre la zincatura è stata possibile.



Figura 16: Cerchiate nel Torrazzo Gonzaga

Infine un ulteriore sistema di presidio largamente utilizzato è il sistema a **gabbia**. La struttura è alquanto complessa, la costruzione viene avviluppata e i ritegni sono principalmente chiusi in se stessi e con controventi. I materiali utilizzati sono legno ed acciaio o solo acciaio. La principale differenza con il sistema della cinturazione è che, in questo caso, si ha una forte interazione fra vecchia e nuova struttura.

Essendo però questo un sistema ingombrante, è maggiormente difficile la sostituzione del presidio con il consolidamento e ricostruzione finale; per questo motivo la cinturazione che si slaccia facilmente è preferibile.

Un caso emblematico di pronto intervento è rappresentato da quello per il campanile di Reno Centese (fig.17) che è stato colpito dal sisma del 20 maggio 2012 quando erano in corso lavori di ristrutturazione, e c'era quindi un ponteggio montato. Il campanile presentava in una zona dove erano ricavate due aperture (quindi limitata) una lesione diagonale di notevole ampiezza (c.a.10 cm) estesa sulle quattro facciate, parziale espulsione di alcuni pannelli murari, inoltre la parte superiore alla lesione aveva subito una dislocazione di 20 cm (meccanismo di danno n.5). Non si evidenziavano altri danni macroscopici eccetto una sottile lesione circolare sulla guglia superiore, indice di sollecitazione flessionale.



La struttura era a rischio di imminente collasso: per questo era stata creata una “zona rossa” all’interno della quale era inibita qualsiasi attività ivi compreso l’agibilità delle abitazioni.

Era quindi necessario ripristinare rapidamente le caratteristiche statiche della struttura in modo da garantirne la stabilità soprattutto in caso del ripetersi dell’evento sismico.

Per garantire la sicurezza delle maestranze è stata preliminarmente utilizzata una malta di cemento fibro-rinforzata applicata a spruzzo, utilizzando un’apposita lancia lunga 52 m per suturare le ampie lesioni di cui si è detto. La malta aveva un basso coefficiente di contrazione di volume, elevata resistenza meccanica a trazione e compressione nonché elevata energia di rottura. In questo modo la malta depositata, oltre a chiudere le fessure, ha creato una sorta di placcaggio con effetto di confinamento nei confronti della muratura sottostante. La tecnologia è la stessa utilizzata per stabilizzare le volte delle gallerie.



Figura 17: Campanile di Reno Centese: applicazione di betoncino proiettato e bendaggio con FRP

Si è successivamente proceduto a un bendaggio in direzione verticale e orizzontale con strisce a doppio strato di fibra di vetro e fibra di carbonio; in questo modo è stato possibile restituire l’area agli abitanti togliendo la zona rossa e iniziando il processo di riparazione interno in tutta sicurezza.

## 5 Verifiche sismiche e interventi di rinforzo

Per la verifica sismica delle costruzioni snelle isolate, in accordo con [DM], [CC], [LG]: è necessario considerare l’interazione terreno-struttura; in particolare non è possibile trascurare la deformabilità della fondazione in quanto nella determinazione delle azioni statiche equivalenti l’incastro alla base nel modello dinamico comporterebbe forze orizzontali superiori a quelle realisticamente attese.

Le analisi sono state svolte sia nel caso di vincolo rigido (incastro), come riferimento, sia nel caso di vincolo elastico (molla rotazionale) (fig. 18).

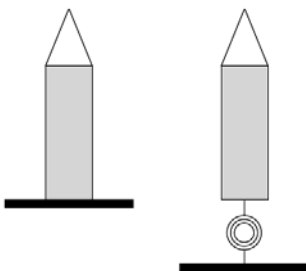


Figura 18: Modello di torre snella con incastro alla base o molla rotazionale

Nel caso di vincolo elastico, numerosi sono stati gli studi per la valutazione della rigidezza rotazionale della molla, in particolare:

- Gazetas (1991) propose [10] la seguente formula basata sull'utilizzo di moduli ridotti:

$$K_{\alpha} = \frac{3,6 \cdot G \cdot B^3}{(1-\nu)} \text{ [kNm]} \quad (1)$$

dove

- G = modulo di elasticità tangenziale
- B = dimensione caratteristica della fondazione quadrata
- $\nu$  = coefficiente di Poisson
- Viggiani (1999) propone [11] la seguente formula per lo strato di terreno subito al di sotto la fondazione rigida:

$$K_{\alpha} = \frac{E \cdot B^3}{I_{\alpha} (1-\nu^2)} \text{ [kNm]} \quad (2)$$

dove

- E = modulo di Young
- $\nu$  = coefficiente di Poisson
- B = dimensione caratteristica della fondazione quadrata
- $I_{\alpha}$  = coefficiente di influenza adimensionale il cui valore dipende dalla forma della fondazione in pianta e dal modello utilizzato per il sottosuolo (fornito dal proponente).

In base a valori minimi e massimi di E o G si ottengono due valori di  $K_{\alpha}$  che rappresentano il limite superiore e inferiore della rigidezza del vincolo elastico, tale valore viene poi moltiplicato per un coefficiente  $f_D$  che tiene conto della profondità della fondazione [10].

Prima di procedere con le verifiche delle torri campanarie, è necessario determinare le caratteristiche meccaniche della muratura attraverso prove non distruttive (PnD).

La analisi vibrazionale per input ambientali è fondamentale per identificare i parametri del modello analitico/numerico che verrà adottato in verifica sismica secondo la normativa.

Numerose sono le procedure standard di verifica su modello dei campanili previste dalle norme.

Una prima possibilità è rappresentata dall'analisi dinamica modale, determinazione delle forze sismiche da spettro del sito, con verifica tensionale a trave: tale procedura non porta a risultati affidabili se si osservano gli effettivi stati di danno post-sisma.

Utilizzando l'approccio dei Macro-elementi, considerando la muratura infinitamente rigida, resistente a compressione e non a trazione, è possibile utilizzare l'analisi limite per meccanismo parziale e/o totale che, se sapientemente applicata, risulta efficace, anche leggendo i meccanismi evidenziatisi durante i recenti terremoti (fig.1).

In particolare si considerano differenti meccanismi di collasso, anche a cesura inclinata [4], al fine di determinare il più piccolo moltiplicatore del carico che porta alla formazione di una cerniera cilindrica su uno dei lati della sezione del campanile. Dal meccanismo si risale alla accelerazione di picco che lo provoca: si può fare così un raffronto capacità/domanda sismica.

Per analisi più approfondite si utilizza la *push-over*, si procede cioè alla verifica della torre campanaria per successivi incrementi di carico orizzontale fino a quando si raggiunge il collasso [5]; questa procedura risulta complessa, richiede molti dati di input ed è sensibile ad alcune scelte sui percorsi di carico che sono pur sempre statici "equivalenti".

In moltissimi casi di torri o campanili la verifica sismica non porta a risultati positivi se si considerano le azioni della attuale norma sulle costruzioni.

Resta la possibilità di operare nel senso di un *miglioramento*, aumentando la duttilità della struttura (con espedienti tecnologici, ossia cinturazioni, repointing armato,...), e quindi considerando un abbattimento delle forze sismiche di modellazione mediante un più elevato fattore di struttura.

Inizialmente gli interventi di rinforzo strutturale di alcune costruzioni storiche furono eseguiti con la tecnica dei compositi FRP (Fiber Reinforced Polymer).

Il primo caso in Italia di utilizzo di materiali fibro-rinforzati è rappresentato dal già citato Torrazzo Gonzaga per il quale nel 2001 lo scrivente prof Di Tommaso, allora docente alla Università I.U.A.V. di Venezia, propose, insieme agli ingg A. D'Ambrisi e P. Foraboschi, di foderare il tamburo del Torrazzo [4] con composito in fibra di carbonio (fig.19). Questa soluzione, successivamente realizzata, avrebbe contrastato i potenziali meccanismi di collasso del tamburo del cupolotto in ulteriori crisi sismiche, avendo anche provveduto a cinturare internamente il fusto della torre con barre ad alto limite elastico [7].

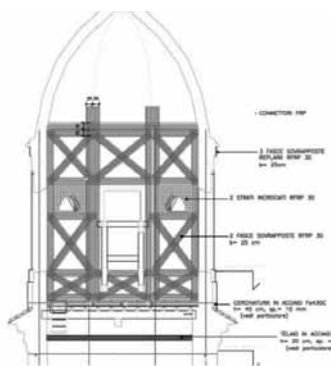


Figura 19: Intervento con materiali fibro-rinforzati nel Torrazzo Gonzaga

Un altro esempio simile è stato proposto nel 2007 dal Prof. E. Cosenza et al. dell'Università di Napoli per un campanile nella regione Marche (Italia). E' stato utilizzato il composito all'interno per favorire l'interazione tra le due strutture in quanto il campanile risulta innestato all'interno della chiesa (fig.20).

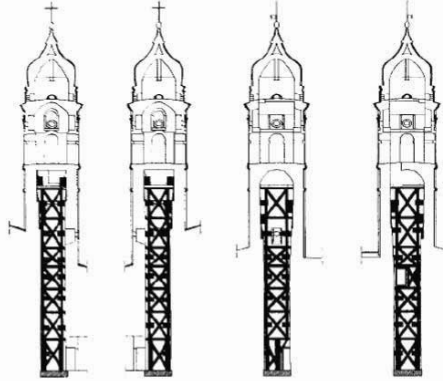


Figura 20: Campanile rinforzato con composito nella regione Marche

Un'evoluzione dei compositi più adatta alle murature storiche è rappresentata da FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), una matrice a base cementizia modificata con polimero e armata con rete in fibra di carbonio. Caso notevole l'impiego di FRCM nella ricostruzione della Cattedrale di Noto, dopo il crollo per cedimento strutturale dei pilastri. In questo caso il composito è stato usato per placcaggio degli arconi ricoprenti la navata e nei giunti di malta della cupola ricostruita. Attualmente la tecnica ha fondamento scientifico.

Le catene metalliche, ove presenti, hanno avuto effetti benefici evitando meccanismi di collasso per ribaltamento, quindi, in fase di ricostruzione, si dovrà fare largo uso di catene metalliche con efficaci ritegni (piastre o capochiavi), meglio se posizionati all'esterno del muro.

Un caso significativo di interazione di torre addossata è rappresentato dalla torre Civica di Ravenna (RA). La torre infatti risulta in adiacenza all'edificio Casa Melandri ma sulla facciata di quest'ultima sono evidenti lesioni dovute al contatto tra la copertura dell'edificio (fig.21).



Figura 21: Interazione tra la torre Civica e Casa Melandri (RA)

L'edificio Casa Melandri ha una struttura interna in calcestruzzo armato per cui si è potuta modellare la interazione in fase di verifica sismica.

L'interazione tra i due edifici infatti è stata modellata con l'inserimento di due molle traslazionali in corrispondenza del solaio di piano e del coperto di Casa Melandri la cui rigidità è stata valutata assumendo il modello di telaio shear-type (fig. 22).

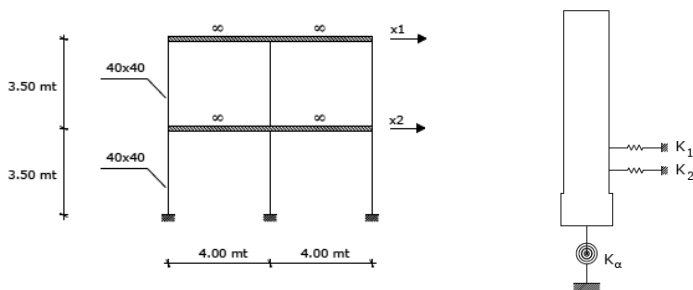


Figura 22: Modellazione dell'interazione tra la torre Civica e Casa Melandri (RA)

Gli interventi di rinforzo eseguiti in passato, dopo la demolizione di una parte superiore della torre, sono stati l'inserimento di una gabbia metallica esterna a metà altezza residua e di una fodera interna in calcestruzzo armato.

Nella verifica sismica su modello a trave con molle rotazionali alla base e molle di interazione laterale, i principali risultati ottenuti sono stati: periodo, frequenza e accelerazione spettrale per i primi cinque modi di vibrare oltre ai diagrammi di momento flettente, taglio e sforzo normale dovuto al peso proprio della muratura, della gabbia metallica e della fodera interna in calcestruzzo armato ed alle forze sismiche equivalenti [6].

Sono state svolte anche l'analisi limite e l'analisi push-over oltre che una verifica riguardante la fondazione.

Il modello assunto è stato considerato affidabile per la congruenza fra la sperimentazione vibrazionale con input ambientali e risultati desumibili dal modello.

Le conclusioni a cui si è giunti sono state alcune criticità sulla stabilità globale e sulla resistenza della muratura a sacco in fase sismica.

## 6 Due casi significativi: Campanile di San Barnaba e Torre della Ghirlandina a Modena

### 6.1 Campanile di San Barnaba

Il Campanile di San Barnaba (MO) risulta *sovrapposto* all'edificio di culto (fig.23). In questo caso l'analisi dinamica risulta complessa quindi si preferisce operare la verifica con l'analisi limite considerando quindi i meccanismi di collasso.



Figura 23: Campanile di San Barnaba (MO)

Si è proceduto studiando i due meccanismi di collasso principali (fig. 24):

- meccanismo 1: distacco e ribaltamento di un blocco del fusto, posto alla base della parte svettante attorno ad una cerniera sul lembo della sezione di base;
- meccanismo 2: meccanismo a telaio della cella campanaria.

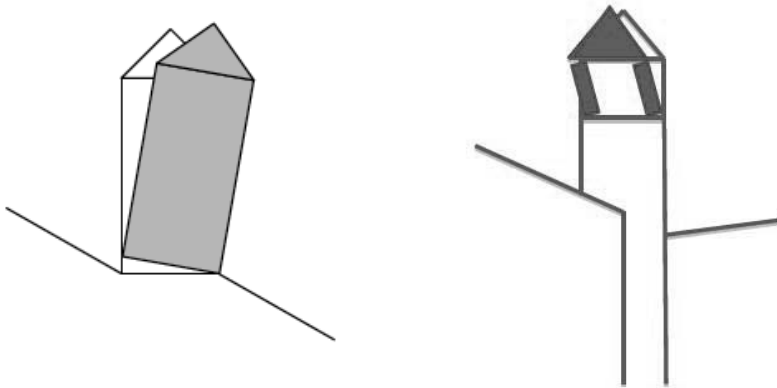


Figura 24: Meccanismi di collasso considerati per il campanile di San Barnaba (MO)

Successivamente è stato progettato il rinforzo per incrementare le forze di attivazione del meccanismo.

Per questa torre campanaria è stato infatti proposto ed in fase di attuazione un intervento di consolidamento basato sull'introduzione di profili metallici a L in acciaio inox e compositi in CFRP, avente la finalità di ostacolare i meccanismi probabili ipotizzati.

## 6.2 Torre della Ghirlandina

La Torre della Ghirlandina (MO) è la torre campanaria del Duomo di Modena (fig.25) e dal 1997 il Duomo, la Torre della Ghirlandina e Piazza Grande fanno parte del Patrimonio Mondiale dell'Umanità (UNESCO).



Figura 25: Torre della Ghirlandina (MO)

Nel 2009 uno degli autori (A. Di Tommaso) ha ricevuto l'incarico dal Comune di Modena di operare una verifica sismica della torre; le analisi effettuate sono consistite in:

1. **analisi dinamica modale** per determinare le caratteristiche di sollecitazione sulle sezioni orizzontali della torre, legate alle forze sismiche equivalenti, e per procedere poi con la verifica a pressoflessione e taglio
2. **analisi per meccanismi di collasso** per ottenere i valori di accelerazione spettrale che hanno portato all'individuazione di alcuni meccanismi di collasso locali e globali.

Per l'**analisi dinamica modale** si è utilizzato un modello agli elementi finiti (FEM) costituito da elementi di tipo "beam" vincolato alla base mediante molle rotazionali, con i criteri esposti precedentemente al paragrafo 5. In questo modello, interamente dedicato alla determinazione delle sollecitazioni derivanti da sisma, sono stati trascurati gli effetti dovuti all'inclinazione della torre che invece sono stati tenuti in conto nelle verifiche sommando alle sollecitazioni derivanti da sisma quelle prodotte dal peso proprio sulla configurazione inclinata [8].

Nella figura sottostante è rappresentata la geometria considerata nel modello (fig.26).

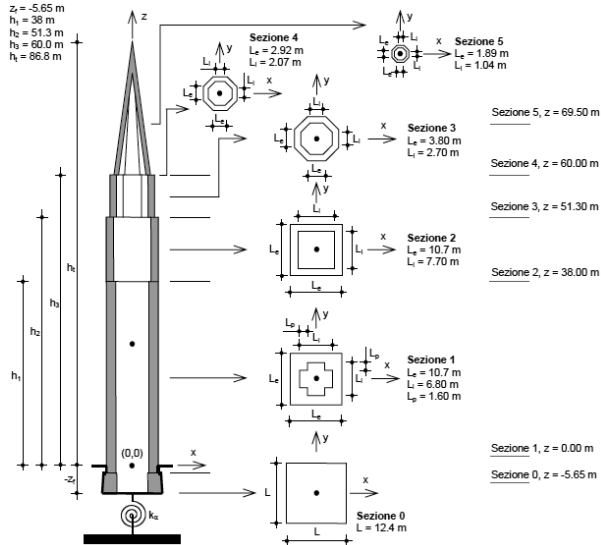


Figura 26: Geometria considerata nel modello

Successivi studi di analisi vibratorie con input ambientale hanno confermato la affidabilità del modello [9].

Al termine dell'analisi si è osservato che:

- tutte le sezioni sono verificate a taglio;
- la rigidità della molla alla base influenza sostanzialmente il primo modo di vibrare e quindi le caratteristiche di sollecitazione della torre sotto sisma; in particolare nel caso di molla più rigida la capacità flessionale della sezione di base è solo il 54% della domanda, nel caso di molla più deformabile la capacità flessionale della sezione di base è di pochissimo superiore alla domanda;
- le sezioni sopra la quota di circa 60m risultano non verificate a pressoflessione; i rapporti tra capacità e domanda per queste sezioni risultano comunque comparabili a quelli per le sezione di base.

I principali meccanismi considerati nell'**analisi per meccanismi di collasso** sono (fig.27):

- meccanismo 1A: ribaltamento della torre attorno ad una cerniera posta alla quota del piano di campagna sul lembo della sezione;
- meccanismo 1B: ribaltamento della torre attorno ad una cerniera posta alla quota del piano di campagna in corrispondenza della risultante delle tensioni di compressione sulla sezione;
- meccanismo 1C: ribaltamento della torre attorno ad una cerniera posta alla quota del piano di fondazione in corrispondenza della risultante delle tensioni di compressione sul terreno;
- meccanismo 2: ribaltamento della guglia attorno ad una cerniera sul lembo della sezione di base della guglia stessa;



- meccanismo 3: ribaltamento della guglia e di una parte del tamburo ottagonale attorno ad una cerniera sul lembo della sezione di base del tamburo;
- meccanismo 4: ribaltamento di metà guglia attorno ad una cerniera sul lembo della sezione di base della guglia stessa;
- meccanismo 5: ribaltamento di una colonnina posta alla base della guglia attorno ad una cerniera sul lembo della sezione stessa.

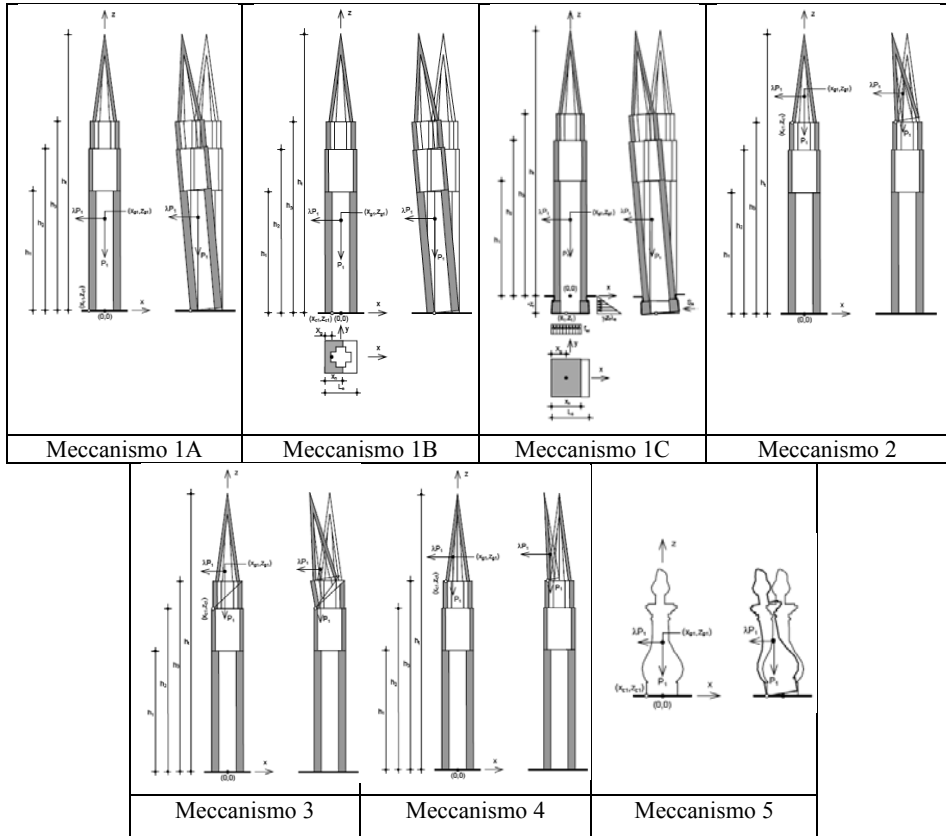


Figura 27: Principali meccanismi di collasso

In seguito all'analisi si è osservato che:

- i risultati ottenuti con le due analisi sono comparabili
- il meccanismo di più probabile attivazione è quello di ribaltamento globale sul piano di fondazione (minimo rapporto capacità/domanda)
- la rigidità della molla alla base schematizzante la deformabilità del terreno di fondazione ha una sostanziale influenza sui risultati.

Ulteriori approfondimenti in ricerche successive hanno evidenziato modesti incrementi di vulnerabilità nei meccanismi con cesure inclinate che ampliano la gamma già considerata.

Avendo individuato alcune criticità nelle fessure verticali esibite dal fusto, sulla base di tutti i risultati esposti si è provveduto a cinturarlo con barre e piastre d'angolo esterne ed inoltre ad applicare un esteso "repointing" (ristilatura) con lamina di carbonio nei giunti orizzontali del paramento interno.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Doglioni, A. Moretti, V. Petrini, *Le chiese ed il terremoto*, LINT, Trieste 1994
- [2] M. Tuti, R. Ongaro, L. Saccomanno, S. Zanin – *da un campanile all'altro* – Vol. curato da Parr. SS Pietro e Paolo Ap., Majano 2012.
- [3] N. R. Dehkordi, *Vulnerability of Masonry slender buildings in seismic area*, Tesi laurea M. Civil Eng., Rel. A. Di Tommaso, Bologna, 21 dic.2012.
- [4] F. Romaro, *A study on seismic behaviour of masonry towers. Case Study: Ghirlandina tower in Modena*, Tesi PhD, Tutor: A. Di Tommaso, Trento, 2011.
- [5] V. Mariani, *Non linear seismic analysis of slender masonry towers*, Tesi PhD, Tutors: A. D'Ambrisi et M. Mezzi, Firenze, 2013.
- [6] E. Rocchetti, *La torre civica di Ravenna: evoluzione delle condizioni di vulnerabilità*, Tesi laurea M, Ing. Civ., Rel. A. Di Tommaso, Bologna, 2012.
- [7] A. Di Tommaso, *Consolidamento contemporaneo C-1-6*, in *Trattato del consolidamento*, a cura di Rocchi, Mancosu Editore, Roma, 2003.
- [8] A. Di Tommaso, R. Lancellotta, F. Focacci, F. Romaro, *Uno studio sulla stabilità della torre Ghirlandina*, nel vol. *La torre Ghirlandina* a cura di R.Cadignani, L.Sossella Editore, Roma,2010.
- [9] A. Di Tommaso et al. *Dynamic identification and seismic behaviour of the Ghirlandina Tower in Modena*, Geotechnical Engineering, Napoli, 2013
- [10] G. Gazetas, *Foundation vibrations*, in *Foundation Engineering Handbook*, ch.15, van Nostrand Reinhold,N.Y.,1991.
- [11] C. Viggiani, *Fondazioni*, Helvelius Edizioni, Benevento 1999
- [12] F. Focacci, *Rinforzo delle murature con materiali compositi*, D. Flaccovio, 2008.
- [13] F. Clementi, S. Lenci, *I compositi nell'ingegneria strutturale*, Esculapio, 2009.
- [14] E. Cosenza, I. Iervolino, *Case Study: Seismic Retrofitting of a medieval Bell Tower with FRP*, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2007, n.321

## Standards

- [DM] D.M. 14 genn. 2008. *Norme Tecniche per le costruzioni*.
- [CC] Circolare 2 febr. 2009, n. 617. *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni* di cui al decreto ministeriale 14 genn. 2008
- [LG] Linee Guida: *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le costruzioni*. Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 2-2-2011.
- [CNR] CNR-DT 200/2004 *Istruzione per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibro-rinforzati*, CNR, Roma, 2004.